

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.20>

УДК 614.843-026.612

ГЕНЕРАТОР НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАКАЧКИ ДЛЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ ВИДЕНИЯ В ДЫМУ И РАСЧЕТ ДАЛЬНОСТИ ЕЕ ДЕЙСТВИЯ

Суриков А.В., Лешенюк Н.С., Кулешов В.К.

Цель. Разработать генератор наносекундных импульсов для его применения в составе активно-импульсной системы видения в условиях пожара и провести анализ влияния уменьшения энергии импульса лазерной подсветки и спектральной чувствительности электронно-оптического преобразователя системы на дальность ее действия.

Методы. Значения амплитуды импульса, формируемого разработанным генератором, определялись экспериментально. Зависимости изменения дальности действия активно-импульсной системы видения от энергии импульса лазерного излучателя и спектральной чувствительности электронно-оптического преобразователя определялись расчетным методом.

Результаты. Разработан генератор наносекундных импульсов, позволяющий формировать импульсы тока амплитудой до 60 А, длительностью по уровню 0,5 $\tau \geq 2$ нс с фронтами 3–1,4 нс. Представлен аналитический метод расчета дальности действия активно-импульсной системы видения, позволяющий определять данный параметр с учетом длины волны зондирующего излучения и динамики пожара. Представлены результаты теоретического анализа дальности действия активно-импульсной системы видения при изменении энергии импульса подсветки лазерного прожектора и спектральной чувствительности электронно-оптического преобразователя системы.

Область применения исследований. Результаты исследования могут быть применены при разработке технических средств, предназначенных для формирования изображения объекта в условиях задымления.

Ключевые слова: активно-импульсная система видения, видимость, длительность импульса лазерного прожектора, показатель ослабления оптического излучения, длина волны зондирующего излучения.

(Поступила в редакцию 20 января 2021 г.)

Введение

Ограниченная видимость как один из факторов пожара оказывает влияние на скорость ориентирования в помещениях и проведения работ спасателями-пожарными по тушению пожаров, поиску и спасению людей.

Применяемые для целей улучшения видимости приборы (осветительные фонари, телевизионные системы, тепловизоры) не убирают помехи обратного рассеяния света и теплового излучения, что накладывает серьезные ограничения на возможности их применения. Для успешного решения данной проблемы перспективным является применение оптико-электронных систем, известных как активно-импульсные системы видения (АИСВ).

Принцип действия АИСВ основан на применении метода стробирования по дальности. Объект наблюдения освещается короткими лазерными импульсами длительностью $t_{имп}$, формируемыми лазерным прожектором. Отраженный от объекта наблюдения сигнал регистрируется оптическим прибором (приемной системой), состоящим из приемного объектива, оптического фильтра с максимумом полосы пропускания на длине волны лазерного излучения, электронно-оптического преобразователя (ЭОП). ЭОП выполняет функции усилителя яркости изображения и быстродействующего затвора, открывающегося на заданное короткое время $t_{ЭОП}$ в такт с излучением световых импульсов. Видеоизображение на мониторе образуется после передачи через согласующий элемент усиленного ЭОП оптического изображения на ПЗС-матрицу. В качестве согласующих элементов применяются линзовые согласующие объективы, фоконы или волоконно-оптические элементы [1; 2].

В том случае, когда временная задержка между моментом излучения импульса и моментом открывания затвора $t_{зат}$ равна удвоенному времени, необходимому для прохождения светом расстояния до объекта и обратно, наблюдатель будет видеть только сам объект и участок пространства (глубину просматриваемого пространства $\Delta l_{набл}$), непосредственно его

окружающий. В общем случае расстояние до наблюдаемого объекта $l_{об}$ определяется по формуле:

$$l_{об} = ct_{зад}/2, \quad (1)$$

где c – скорость света, м/с; $t_{зад}$ – временная задержка между моментом излучения импульса света лазерным прожектором и моментом открывания ЭОП, с.

АИСВ преимущественно применяются для улучшения видимости в тумане. Вместе с тем известно применение систем для получения изображений в воздушных, наземных, надводных и подводных условиях в зависимости от их назначения [3] на достаточно больших расстояниях (более 200 м). Количественная оценка улучшения видимости с применением АИСВ – отношение дальности действия системы $l_{действ}$ к предельной видимости человеком объекта наблюдения при задымлении $l_{пр}$ – проведена в работе [2]. Показано, что применение АИСВ позволяет получать изображения при задымлении на расстоянии в 3 раза большем, чем предельная видимость, т.е. без средств улучшения видимости.

Дальность действия АИСВ $l_{действ}$ – максимальное расстояние, на котором объект наблюдения может быть обнаружен и распознан, – зависит:

- от технических характеристик ЭОП (спектральная чувствительность, диаметр рабочего поля);
- технических характеристик ПЗС-матрицы (геометрические размеры, количество элементов);
- оптических характеристик излучающего блока и приемной системы (угол расходимости луча, пропускная способность оптических элементов);
- параметров лазерного прожектора (мощность излучения, длительность импульсов и их количество при формировании кадра);
- параметров рассеивающей среды и отражающей способности объекта наблюдения [4–6].

Для получения качественного изображения длительность импульсов $t_{имп}$ должна быть значительно (5–10 раз) меньше времени распространения света до объекта и обратно $t_{зад}$. Следовательно, уменьшение $t_{имп}$ является определяющим фактором для решения задачи по формированию изображений на малых расстояниях. Предварительная оценка значения $t_{имп}$ для АИСВ, применяемых в условиях задымления в помещениях, может быть проведена согласно формуле (1). Если принять размер помещений равным 3–5 м, то время задержки $t_{зад}$ будет равно 20–33 нс. Следовательно, исходя из условий качественного формирования изображения, длительность импульса лазерного прожектора $t_{имп}$ должна быть значительно меньше данного временного интервала и составлять 4–7 нс.

Характеристики коротких наносекундных импульсов излучения полупроводниковых лазеров определяются режимом накачки. Длительность и частота следования лазерных импульсов практически совпадают с формирующими импульсами тока накачки [7]. Поэтому при разработке лазерного прожектора АИСВ с короткими наносекундными импульсами основной задачей является разработка генератора коротких импульсов высокой мощности.

Уменьшение длительности импульсов лазерного излучения приводит к уменьшению энергии, попадающей на фотоприемник ЭОП и ПЗС-матрицу. Это приведет к изменению дальности действия системы $l_{действ}$, что необходимо учитывать при разработке АИСВ.

Дальность действия $l_{действ}$ также существенно зависит от параметров среды распространения лазерного излучения и технических характеристик элементов системы, в частности, спектральной чувствительности ЭОП.

В существующих методиках расчета АИСВ [4–6], применяемых для определения $l_{действ}$ в условиях тумана, не учитывается зависимость показателя ослабления k от длины волны λ зондирующего излучения. При этом k для тумана принимается постоянной величиной, определяемой согласно стандартному ряду Международного кода видимости [8]. Например, для густого тумана k равен $0,0196 \text{ м}^{-1}$. Этот подход ограничен условием, согласно которому при размере рассеивающих частиц более 1,2 мкм интенсивность рассеяния оптического излучения в ближнем ИК-диапазоне не зависит от λ . Максимум кривой распределения по размерам капель тумана обычно находится в диапазоне 5–15 мкм [4], что определяет корректность применения данного подхода.

Дым является очень сложной и динамичной системой. Очевидно, что его морфологические и оптические свойства отличаются от свойств тумана. Показатель ослабления k для дыма зависит от λ и времени горения пожарной нагрузки τ .

В данной работе приведены результаты исследований разработанного генератора наносекундных импульсов, обеспечивающего временные параметры АИСВ для их применения в помещениях в условиях пожара, а также представлены результаты оценки дальности действия системы с учетом уменьшения энергии сигнала, регистрируемого ее приемным блоком, и зависимости показателя ослабления k от длины волны λ зондирующего излучения.

Основная часть

Разработка и исследование генератора наносекундных импульсов. Источником питания лазерных прожекторов АИСВ служат специально разрабатываемые генераторы импульсов тока. Для применения АИСВ в условиях пожара такие генераторы должны обладать следующими характеристиками: частота следования импульсов ≈ 5 кГц, амплитуда 50–70 А, длительность 2–5 нс. Схемные решения такого типа генераторов описаны и проанализированы в монографии [9]. Разработанная нами схема представлена на рисунке 1.

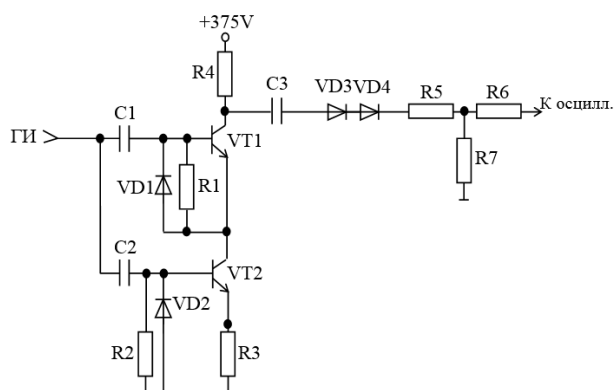


Рисунок 1. – Схема разработанного генератора наносекундных импульсов

Импульсы тока формируются схемой на основе каскодно включенных транзисторов VT1 и VT2, в качестве которых использованы транзисторы КТ630. Сопротивления $R1 = R2 = 2,4$ кОм, $R3 = 0,01$ Ом задают режим работы транзисторов КТ630, диоды VD1 и VD2, в качестве которых используются диоды КД503А, коммутируют паразитные сигналы на базах транзисторов и не допускают повышения силы тока базы выше предельных значений во время формирования выходных импульсов. Входные сигналы поступают на базы транзисторов через разделительные конденсаторы C1 и C2 емкостью 200 пФ. Конденсатор C3 служит накопителем энергии для формирования выходных импульсов. Сопротивление R4, равное 120 кОм, ограничивает силу тока в цепи заряда конденсатора C3. Последовательно с конденсатором C3 включены диоды VD3 и VD4, в качестве которых применены диоды 2Д212А. Величина собственной емкости каждого из этих диодов значительно изменяется при изменении величины и полярности приложенного напряжения, вследствие чего их последовательное включение с емкостью C3 приводит к уменьшению длительности фронтов выходных импульсов и амплитуды обратных импульсов. Сопротивление R5 установлено в схеме равным 3 Ом, что соответствует сопротивлению лазерного излучателя Л-13, включенного в прямом направлении и применяемого в АИСВ. Сопротивление R7 – измерительное сопротивление, равное 0,045 Ом, согласующее сопротивление R6 равно 51 Ом. На вход схемы от внешнего генератора, в качестве которого применялся генератор ГЗ-131, подавались запускающие импульсы со следующими параметрами: частота 5,2 кГц, длительность 0,1 мс, амплитуда 3 В. Измерение выходных сигналов осуществлялось на цифровом осциллографе DLO 5052a (полоса пропускания 500 МГц, время нарастания – 0,7 нс).

При поступлении запускающих импульсов на базы транзисторов VT1 и VT2 они открываются и в лавинном режиме протекания тока происходит разряд емкости C3. Таким образом в схеме формируются рабочие импульсы напряжения и соответствующего тока. Временные параметры импульсов определяются как величиной RC-цепочки, формирующей цепи (R5, VD3, VD4, C3, VT1 и VT2), так и скоростью нарастания лавины в обоих транзисторах VT1 и VT2. На рисунке 2 показана осциллограмма импульса, полученного при $C3 = 20$ пФ и напряжении питания $E_n = 375$ В. Представленный на рисунке 2 импульс имеет амплитуду тока около 58 А при длительности по уровню 0,5 – около 1,8 нс.

Как видно из рисунка 2, импульс имеет несколько отличающиеся по длительности участки нарастания 1 (длительность ≈ 3 нс) и спада 2 (длительность $\approx 1,4$ нс) тока и характерный обратный импульс после них 3 (амплитуда 27 А и длительность по уровню 0,5 $\approx 1,4$ нс). Минимизировать этот выброс можно, предельно сократив длину и, соответственно, реактивное сопротивление разрядной цепи. Полное устранение выброса, как правило, нецелесообразно, поскольку он будет способствовать рекомбинации избыточных зарядов в ла-

зерном диоде и уменьшению длительности заднего фронта светового импульса. Разная длительность переднего и заднего фронтов рабочих импульсов обусловлена главным образом различием скоростей отпираания и запираания формирующих диодов VD3, VD4.

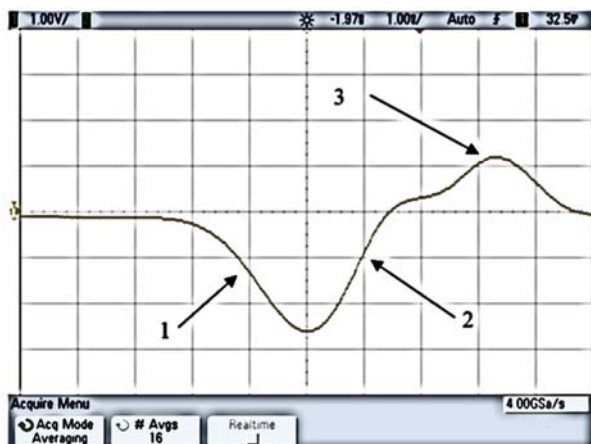


Рисунок 2. – Оциллограмма импульса напряжения, на сопротивлении 0,045 Ом, по вертикали 1 В/дел., по горизонтали 1 нс/дел.

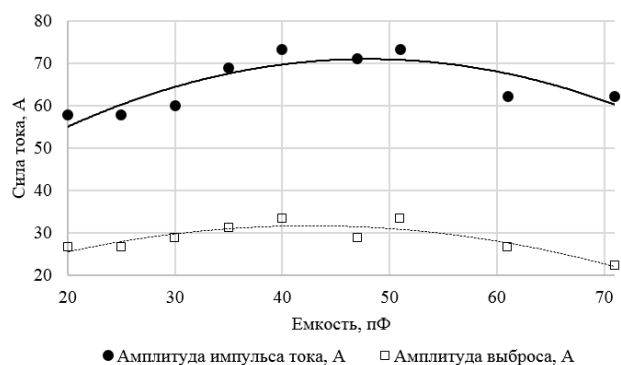


Рисунок 3. – Зависимость амплитуды тока импульса и выброса от накопительной емкости

Для определения влияния величины накопительной емкости С3 на токовые и временные характеристики импульсов была проведена серия измерений при варьировании данной емкости от 5 до 71 пФ. При значении емкости С3 в диапазоне 5–15 пФ схема не запускалась и выходной импульс отсутствовал. При повышении С3 выше 50 пФ происходило уменьшение амплитуды тока, обусловленное нелинейностью характеристик формирующих диодов VD3, VD4. Зависимость изменения амплитуды тока от накопительной емкости С3 приведена на рисунке 3.

Из приведенной зависимости видно, что наибольшая амплитуда тока импульсов соответствует диапазону накопительной емкости С3 от 35 до 50 пФ (около 70 А). Вместе с тем в указанном диапазоне наблюдается некоторое увеличение амплитуды выброса (участок 3 на рисунке 2), которая повысилась от 27 до 33 А. При варьировании С3 в исследуемом диапазоне длительность импульсов по уровню 0,5 и его фронтов практически не изменялась.

Для определения влияния подаваемого напряжения на перевод транзисторов VT1 и VT2 в лавинный режим проведена серия измерений для С3 = 20 пФ при варьировании E_n от 325 до 375 В. При уменьшении напряжения питания E_n ниже 325 В лавинный режим не возникал. При подаче напряжения E_n , превышающего 325 В, происходило плавное увеличение амплитуды импульса тока в лавинном режиме, а при превышении его значения выше 355 В – стабилизация амплитуды на значении около 60 А.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что оптимальными параметрами предложенной схемы генератора наносекундных импульсов являются: накопительная емкость С3 = 20–30 пФ, напряжение питания E_n = 355–375 В. При указанных параметрах предложенная схема позволяет формировать импульсы тока амплитудой до 60 А, длительностью по уровню 0,5 – 2 нс с фронтами 3–1,4 нс.

Для применения АИСВ в условиях пожара целесообразно предусмотреть увеличение длительности импульсов тока накачки лазерного прожектора примерно до 4 нс.

Увеличение длительности импульсов при использовании представленной схемы затруднительно, т.к. постоянная времени разрядной цепи транзисторов КТ630 составляет менее 0,1 нс. Переход на более «медленные» транзисторы или переход от каскадной схемы к параллельному включению транзисторов КТ630 несущественно увеличит длительность импульсов, увеличив длительность фронтов. Увеличение длительности выходного сигнала в рамках исследованного схемотехнического подхода было получено при изменении номинала емкости С3 с дополнительным включением параллельно диодам VD3 и VD4 емкости 200 пФ и последовательно им катушки индуктивности ($L1 = 8$ мкГн) с параллельно включенным резистором 0,39 Ом. Таким образом измененная разрядная цепь позволила увеличить длительность выходного импульса тока до 3 нс.

Дополнительно был исследован двухкаскадный формирователь тока, состоящий из двух последовательно включенных схем, аналогичных представленной на рисунке 2, с той

лишь разницей, что в первой из них последовательно R3 установлена катушка индуктивности ($L2 = 1,3 \text{ мкГн}$), а разрядная выходная цепь второй изменена как указано выше. В результате длительность импульса тока удалось увеличить еще на 0,5 нс.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что на базе отечественных компонентов можно реализовать достаточно простую, малогабаритную схему накачки лазерного прожектора для АИСВ с параметрами: амплитуда тока 50–60 А, длительность импульса 2–3,5 нс и более, длительности фронтов 3–1,4 нс.

Определение дальности действия АИСВ с учетом уменьшения энергии зондирующего импульса. Длительность импульсов лазерного излучателя $t_{имп}$ в существующих АИСВ, как правило, составляет примерно 100 нс. Эффективное применение АИСВ в условиях пожара требует использования импульсов излучения значительно меньшей длительности. Потому целесообразно оценить влияние уменьшения $t_{имп}$ на дальность действия $l_{действ}$ АИСВ. Вопросу оценки дальности действия АИСВ посвящен ряд работ [4–6]. Исходя из уравнения энергетического баланса излучения, дальность действия АИСВ $l_{действ}$ определяется из выражения:

$$l_{действ.} = \frac{k_{проп} n_1}{\gamma_n M_{co}} F_{ex} \sqrt{\frac{\alpha k_{ном\Sigma} n t_{имп} S_\lambda \Phi_{подсв} A_{ПЗС}}{\pi N_l N_h q_e N_{пор}}} \cos \beta, \quad (2)$$

где $k_{проп}$ – коэффициент пропускания среды распространения оптического излучения; n_1 – число суммируемых элементов по одной координате; γ_n – угол обзора системы, рад; M_{co} – модуль коэффициента линейного увеличения согласующей оптики, определяемый отношением диагонали активной фоточувствительной поверхности ПЗС-матрицы к диаметру рабочего поля изображения ЭОП; F_{ex} – относительное отверстие объектива на входе фотоприемника, определяемое отношением диаметра входного объектива фотоприемника к его фокусному расстоянию; α – коэффициент отражения поверхности объекта наблюдения; $k_{ном\Sigma}$ – суммарный коэффициент пропускания излучения оптической части блоков лазерного прожектора и приемной системой АИСВ, равный произведению коэффициента пропускания излучения оптической системой прожектора и коэффициентов пропускания излучения входным объективом фотоприемника и оптическим фильтром (при его наличии); n – количество лазерных импульсов за время формирования одного кадра; $t_{имп}$ – длительность лазерного импульса, с; S_λ – спектральная чувствительность фотокатода ЭОП на длине волны λ лазерного излучателя, А/Вт; $\Phi_{подсв}$ – поток излучения лазерного прожектора (пиковая мощность), Вт; $A_{ПЗС}$ – площадь фоточувствительной поверхности ПЗС-матрицы, м²; N_l, N_h – число элементов ПЗС-матрицы по горизонтали и вертикали соответственно; $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд одного электрона; $N_{пор}$ – пороговое значение числа фотоэлектронов, вылетающих с площадки фотокатода ЭОП, соответствующей одному элементу изображения, которое регистрируется фотоприемником на предельной дальности $l_{действ.}$. Определяется произведением порогового отношения сигнал/шум на число шумовых электронов на элементе изображения, приведенное к фотокатоду ЭОП; β – угол между направлением луча и нормалью к облучаемой поверхности, рад [4; 6].

Коэффициент пропускания среды $k_{проп}$ определяется по формуле:

$$k_{проп} = e^{-kl_{действ}k_{ен}}, \quad k_{ен} = \left(1 + e^{\frac{\gamma_n}{2\mu}}\right) \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma_n}{4} + e^{-\frac{\gamma_n}{2\mu}}, \quad (3)$$

где $k_{ен}$ – коэффициент уменьшения показателя ослабления за счет рассеяния проходящего излучения «вперед», который принимает значения от 0 до 1; μ – параметр, характеризующий вытянутость индикатрисы рассеяния; k – показатель ослабления излучения вследствие рассеяния.

Показатель ослабления k зависит от длины волны зондирующего излучения λ , от времени горения τ и типа пожарной нагрузки и определяется по формуле:

$$k_\lambda(\tau) = \frac{BD_\lambda Z}{V} \left(1 - e^{-A\tau^n/B}\right), \quad (4)$$

где B – размерный параметр, зависящий от теплоты сгорания горючего материала и свободного объема помещения, кг; D_λ – дымообразующая способность горящего материала, опре-

деляемая для заданной длины волны зондирующего излучения, $\text{Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$; Z – параметр, учитывающий неравномерность распределения ОФП по высоте; V – свободный объем помещения, м^3 ; A – размерный параметр, учитывающий удельную массовую скорость выгорания горючего материала и площадь пожара, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-n}$; n – показатель степени, который зависит от характера распространения пламени. Параметры A , B , Z и n определяются по стандартной методике ГОСТ¹.

Для оценки корректности применения формулы (2) был проведен расчет дальности действия экспериментального образца АИСВ, описанного в работе [2], для прозрачной среды, т.е. при $k_{\text{прон}} = 1$. В результате расчета дальность действия $l_{\text{действие}}$ составила 313 м, что соответствует заявленным характеристикам системы (дальность наблюдения до 300 м [10]).

Далее были проведены расчеты дальности действия АИСВ при уменьшении длительности и, соответственно, энергии зондирующего импульса. Поскольку провести расчет абсолютных значений $l_{\text{действие}}$ достаточно сложно, данную оценку проводили на примере исследованного в работе [2] образца АИСВ с длительностью импульсов подсветки 120 нс. Указанный образец имел следующие технические характеристики: длина волны излучателя ~840 нм; частота следования импульсов – 520 Гц; амплитуда тока накачки 20–45 А; пиковая мощность импульса лазерного излучения 320 Вт; количество лазерных импульсов за время формирования одного кадра – 93; коэффициент пропускания оптической системы прожектора – 0,9; диаметр входного объектива – 48 мм, его фокусное расстояние – 135 мм; спектральная чувствительность фотокатода ЭОП на длине волны λ (850 нм) лазерного излучателя – 170 мА/Вт; диаметр рабочего поля изображения – 18 мм; коэффициент пропускания входного объектива фотоприемника – 0,9; коэффициент пропускания оптического фильтра входного объектива фотоприемника – 0,82; размер и диагональ ПЗС-матрицы – 4,8×3,6 мм и 1/3" (6 мм); число эффективных пикселей – 500×582; угол подсветки – 5°.

На рисунке 4 показаны результаты расчетов $l_{\text{действие}}$ на основании формулы (2) в зависимости от показателя ослабления рассеивающей среды k , выполненных для значений длительностей импульса лазерной подсветки $t_{\text{имп}}$, равной 120, 7 и 4 нс, т.е. при уменьшении энергии импульса подсветки в 17 и 30 раз. Остальные расчетные параметры $l_{\text{действие}}$ приняты одинаковыми для всех трех значений длительности импульсов излучения.

Результаты расчетов показывают, что отношение $l_{\text{действие}}$ при $t_{\text{имп}} = 120$ нс к $l_{\text{действие}}$ при $t_{\text{имп}} = 4$ –7 нс уменьшается с уменьшением прозрачности среды распространения лазерного излучения. Графически данная зависимость представлена на рисунке 5.

Так, для прозрачной среды ($k = 0$, на рисунке 5 не показано) $l_{\text{действие}}$ при $t_{\text{имп}} = 4$ –7 нс по сравнению $l_{\text{действие}}$ при $t_{\text{имп}} = 120$ нс уменьшается в 4–5,5 раза. При уменьшении прозрачности среды, т.е. при увеличении k , данное отношение уменьшается.

В частности, при малых значениях k ($< 0,3 \text{ м}^{-1}$) для системы с $t_{\text{имп}} = 120$ нс дальность действия $l_{\text{действие}}$ превышает $l_{\text{действие}}$ системы с $t_{\text{имп}} = 4$ –7 нс на 30–50 %. При повышении k до значений 1,5–3 м^{-1} дальность действия для АИСВ с $t_{\text{имп}} = 4$ –7 нс ниже всего на 10–20 %. Исходя из уравнения (23) ГОСТ² ($l_{\text{пр}} = 2,38 / k$), значения $k = 1,5$ –3,0 м^{-1} соответствуют расстоянию предельной видимости $l_{\text{пр}}$, равному 1–2 м, т.е. очень сильному задымлению.

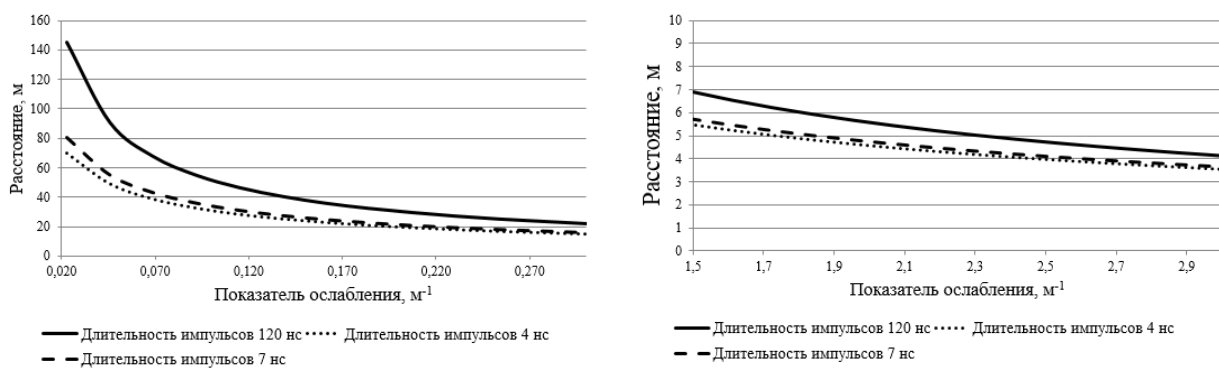


Рисунок 4. – Зависимости дальности действия АИСВ от показателя ослабления при длительности импульсов подсветки 120, 7 и 4 нс

¹ Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Взамен ГОСТ 12.1.004-85; введ. 17.12.91. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 88 с.

² См. сноску 1.

Следовательно, при увеличении прозрачности атмосферы влияние энергии импульса подсветки на дальность действия АИСВ увеличивается. Напротив, при увеличении плотности задымления влияние увеличения энергии импульса подсветки (например, за счет увеличения длительности лазерных импульсов) на $l_{\text{действие}}$ значительно замедляется. Другими словами, улучшение видимости с АИСВ с большим значением $t_{\text{тум}}$ будет выше при меньших плотностях дыма. Однако при определенных значениях показателя ослабления среды это увеличение практически нивелируется. Так, при значениях показателя ослабления k 1,5–3,0 м⁻¹ (т.е. при расстоянии предельной видимости $l_{\text{пр}}$, равном 1–2 м) уменьшение дальности действия АИСВ $l_{\text{действие}}$ за счет уменьшения длительности импульса подсветки в 30 раз составит около 10–20 % (рис. 5).

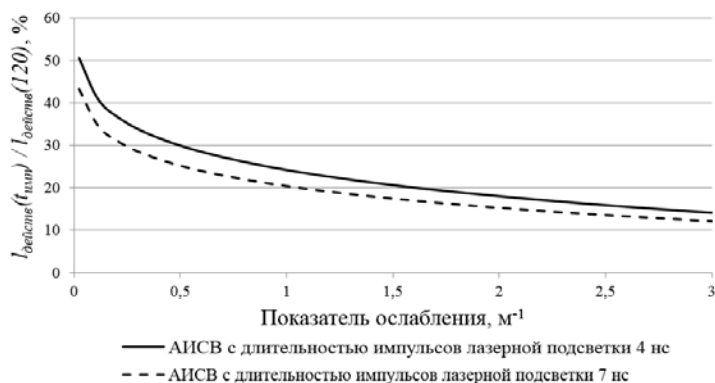


Рисунок 5. – Зависимость изменения дальности действия АИСВ от показателя ослабления при уменьшении длительности импульсов лазерного прожектора

Определение дальности действия АИСВ с учетом длины волны зондирующего излучения. Как следует из формулы (2), дальность действия АИСВ $l_{\text{действие}}$ зависит от спектральной чувствительности фотокатода S_{λ} ЭОП и коэффициента пропускания $k_{\text{прон}}$ на длине волны λ лазерного излучателя. Спектральная чувствительность фотокатода определяется прежде всего поколением разработки ЭОП. На сегодня серийно производятся ЭОП поколения III и III+ с фотокатодами на основе GaAs и проводится разработка перспективных образцов поколений IV и V.

Максимум спектральной чувствительности фотокатодов ЭОП поколения III и III+ находится в диапазоне 400–900 нм. На длине волны 850 нм она составляет 150–190 мА/Вт. Известны ЭОП с фотокатодами на основе InGaAs, имеющие смещенную спектральную чувствительность в область ближнего ИК-диапазона до 1100 нм. Такие ЭОП имеют спектральную чувствительность S_{λ} на длине волны 1060 нм, равную 0,025–0,35 мА/Вт. На данной длине волны стандартные ЭОП поколения III и III+ имеют S_{λ} , равную 0,7 мА/Вт [11].

К наиболее перспективным разработкам ЭОП как элемента АИСВ следует отнести фотоприемные модули с фотокатодами с барьером Шоттки со спектральной областью чувствительности до 1700 мкм. Данные модули имеют спектральную чувствительность S_{λ} на длине волны 1540 нм, равную 44 мА/Вт [12]. Это дает возможность применения лазерных прожекторов с длиной волны более 850 нм. Такие прожекторы, безусловно, будут способствовать более эффективному ослаблению помехи обратного рассеяния.

Проведем теоретическую оценку изменения дальности действия АИСВ $l_{\text{действие}}$ в зависимости от длины волны зондирующего излучения. С учетом предварительно полученных экспериментальных зависимостей ослабления оптического излучения при его прохождении через дым от длины волны было определено отношение показателя ослабления на длине волны 1100 нм k_{1100} и на длине волны 1700 нм k_{1700} к показателю ослабления на длине волны 850 нм k_{850} . Эти отношения составили: $k_{1100}/k_{850} = 0,78$, $k_{1700}/k_{850} = 0,51$.

Тогда при увеличении λ с 850 нм до 1100 нм на основании формулы (2) значение дальности системы $l_{\text{действие}}$ увеличивается в 1,2 раза, а при увеличении λ с 850 нм до 1700 нм – в 1,5 раза.

Однако полученные значения определены при условии неизменности параметров системы, что не всегда справедливо. Во-первых, для рассматриваемого нами целевого применения АИСВ энергия импульса будет уменьшаться вследствие уменьшения длительности

Полученные результаты подтверждаются результатами работы [6] относительно расчетной оценки влияния энергии импульса на дальность АИСВ, проведенной для условий тумана.

Это позволяет сделать вывод, что уменьшение длительности импульсов подсветки до значения 4–7 нс при одновременном уменьшении расстояния до объекта наблюдения до 3–5 м не оказывают значительного влияния на дальность действия АИСВ при уменьшении энергии импульса подсветки до 30 раз.

импульсов подсветки $t_{имп}$. Во-вторых, S_λ при увеличении λ как было отмечено, заметно снижается. Например, в современных фотоприемных модулях с фотокатодом с барьером Шоттки S_λ приблизительно в 5 раз меньше, чем в стандартных ЭОП с фотокатодами на основе GaAs при $\lambda = 850$ нм. В ЭОП с применением фотокатода на основе InGaAs S_λ при $\lambda = 1060$ нм в 2 раза меньше, чем у стандартных ЭОП поколения III и III+ при данной λ .

На рисунке 6 показана зависимость отношения дальности действия АИСВ при длине волны 1700 и 1100 нм $l_{действ}(\lambda)$ к дальности действия АИСВ при длине волны 850 нм $l_{действ}(850)$ от относительного уменьшения энергии импульса излучения.

Анализ зависимости показывает, что при уменьшении энергии импульса до 100 раз $l_{действ}(1700)$ больше $l_{действ}(850)$ в 1,2–1,5 раза. При $\lambda = 1100$ нм данное отношение составляет 1,1–1,2 раза, т.е. при уменьшении энергии импульса системы несколько уменьшается и эффективность применения лазерной подсветки с длиной волны большей по сравнению со стандартным значением.

В связи с возможностью практической реализации источников зондирующего излучения с длинами волн $\lambda = 1060$ нм и $\lambda = 1540$ нм определены соответствующие отношения значений показателя ослабления к его значению на длине волны 850 нм: $k_{1060} / k_{850} = 0,81$, $k_{1540} / k_{850} = 0,56$.

Для определения эффективности применения АИСВ со смещенной спектральной чувствительностью ЭОП S_λ до 1060 нм была проведена серия расчетов дальности действия АИСВ $l_{действ}(1060)$ в сравнении с $l_{действ}(850)$. Теоретическая оценка показывает, что для достижения увеличения дальности в 1,1–1,2 раза при уменьшении энергии импульсов излучения до 100 раз необходимо повышение спектральной чувствительности ЭОП с фотокатодами на основе InGaAg в 4–8 раз по сравнению со спектральной чувствительностью ЭОП с фотокатодами на основе GaAg. Однако, как отмечено в работе [13], на сегодня значения чувствительности ЭОП с фотокатодами на основе InGaAg близки к теоретически предельным. Это позволяет сделать вывод, что применение лазерных прожекторов на длине волны 1060 нм не является целесообразным.

Для определения эффективности применения ЭОП с максимальной спектральной чувствительностью S_λ на длине волны 1540 нм была проведена серия расчетов дальности действия АИСВ согласно формуле (2). Эффективность определялась как отношение дальности действия АИСВ на длине волны $\lambda = 1540$ нм $l_{действ}(1540)$ к дальности действия АИСВ на длине волны $\lambda = 850$ нм $l_{действ}(850)$. При этом на основании данных [11; 12] значение S_λ для АИСВ с $\lambda = 1540$ нм принималось в 5 раз меньшим по сравнению с АИСВ с $\lambda = 850$ нм. Для учета влияния уменьшения длительности импульса подсветки $t_{имп}$ энергия импульса уменьшалась до 100 раз. Оценка эффективности определялась с учетом степени задымления помещений, т.е. для разных значений показателя ослабления среды k .

Результаты расчетов приведены на рисунке 7.

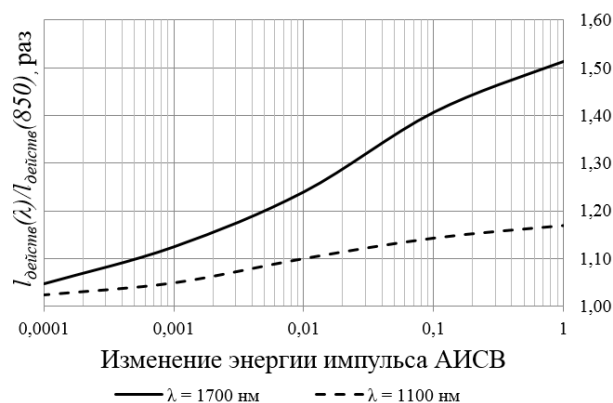


Рисунок 6. – Отношение дальности действия АИСВ при длине волны 1700 и 1100 нм $l_{действ}(\lambda)$ к дальности действия АИСВ при длине волны 850 нм $l_{действ}(850)$

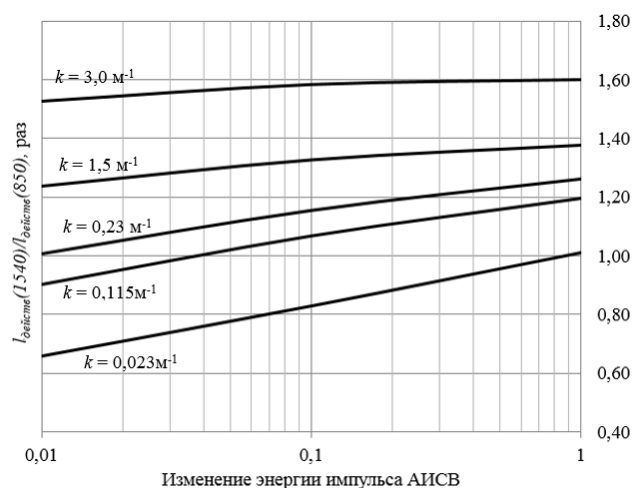


Рисунок 7. – Зависимость отношения дальности действия АИСВ при длине волны 1540 нм $l_{действ}(1540)$ к дальности действия АИСВ при длине волны 850 нм $l_{действ}(850)$ от изменения энергии импульса системы

Из графиков рисунка 7 видно, что при достаточно малых значениях показателя ослабления k ($k = 0,023 \text{ м}^{-1}$) и уменьшении энергии импульса излучения до 100 раз дальность действия АИСВ при $\lambda = 1540 \text{ нм}$ составляет 0,7–1 от дальности действия АИСВ при $\lambda = 850 \text{ нм}$.

При повышении плотности задымления (увеличении k до значений $0,23 \text{ м}^{-1}$, т.е. при предельной видимости l_{np} около 10 м) это отношение увеличивается до 1–1,3.

При дальнейшем увеличении показателя ослабления k (до значений $1,5\text{--}3 \text{ м}^{-1}$, т.е. при предельной видимости l_{np} около 1–2 м) дальность действия АИСВ при $\lambda = 1540 \text{ нм}$ превышает дальность действия АИСВ при $\lambda = 850 \text{ нм}$ в 1,2–1,6 раз во всем исследуемом диапазоне энергии импульса подсветки системы. Это отношение приближается к максимальному значению указанного диапазона при увеличении плотности задымления.

Анализ проведенных расчетов показывает, что при малых значениях плотности задымления основной вклад в значение дальности действия АИСВ $l_{действие}$ при уменьшении энергии импульса системы и увеличении длины волны зондирующего излучения λ от 850 нм до 1540 нм вносит спектральная чувствительность ЭОП. При увеличении плотности задымления это влияние уменьшается и $l_{действие}$ определяется значением коэффициента пропускания среды $k_{проп}$, который увеличивается при увеличении λ . Таким образом, повышение дальности действия АИСВ $l_{действие}$ для помещений размером 3–5 м при применении ЭОП с максимальной чувствительностью на длине волны $\lambda = 1540 \text{ нм}$ по сравнению с АИСВ с применением стандартных ЭОП ($\lambda = 850 \text{ нм}$) составляет 1,2–1,6 раза. Это определяет перспективность применения лазерных прожекторов на длине волны 1540 нм.

Заключение

1. Предложена схема генератора наносекундных импульсов, позволяющая формировать импульсы тока амплитудой до 60 А, длительностью $\geq 2 \text{ нс}$ по уровню 0,5, с фронтами 3–1,4 нс. Данная схема генератора импульсов может быть реализована в АИСВ, предназначенных для использования в помещениях с размерами 3–5 м.

2. Показано, что уменьшение длительности импульсов излучения АИСВ до 4–7 нс при расстояниях до наблюдаемого объекта 3–5 м не оказывает значительного влияния на дальность действия АИСВ. При значении показателя ослабления оптического излучения, равном $1,5\text{--}3,0 \text{ м}^{-1}$, и уменьшении энергии импульса подсветки до 30 раз дальность действия системы уменьшается на 10–20 %.

3. Определено, что при неизменной энергии импульса излучения и спектральной чувствительности ЭОП S_λ дальность системы $l_{действие}$ увеличивается в 1,2 раза при увеличении длины волны зондирующего излучения λ с 850 нм до 1100 нм и в 1,5 раза при увеличении λ с 850 нм до 1700 нм.

При уменьшении энергии импульса излучения до 100 раз отношение дальности действия АИСВ при $\lambda = 1700 \text{ нм}$ к дальности действия АИСВ при длине волны 850 нм увеличивается в 1,2–1,5 раза, а при $\lambda = 1100 \text{ нм}$ – в 1,1–1,2 раза.

Установлено, что для эффективного применения АИСВ на длине волны лазерного прожектора 1060 нм необходимо повышение спектральной чувствительности ЭОП с фотокатодами на основе InGaAg на данной длине волны в 4–8 раз по сравнению со спектральной чувствительностью стандартных ЭОП с фотокатодами на основе GaAg. С учетом того что в настоящее время значения чувствительности ЭОП с фотокатодами на основе InGaAg близки к теоретически предельным, применение лазерных прожекторов на длине волны 1060 нм не является целесообразным.

Перспективным для применения АИСВ в условиях задымления при пожаре является использование лазерных излучателей с длиной волны 1540 нм. При малых значениях плотности задымления (показатель ослабления $k < 0,23 \text{ м}^{-1}$) и уменьшении энергии импульса подсветки системы до 100 раз отношение дальности действия АИСВ при $\lambda = 1540 \text{ нм}$ к дальности действия АИСВ при длине волны 850 нм составляет 1–1,3 раза. При увеличении показателя ослабления до значений $1,5\text{--}3,0 \text{ м}^{-1}$ это отношение составляет 1,2–1,6 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суриков, А.В. Основные методы и устройства, применяемые и перспективные для улучшения видимости при чрезвычайных ситуациях / А.В. Суриков, В.О. Петухов, В.В. Горобец // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2011. – № 1(29). – С. 121–129.

2. Оптико-электронная система улучшения видимости при задымлении / А.В. Суриков [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 2 (20). – С. 4–12.
3. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы для обеспечения навигации транспортных средств в сложных метеоусловиях / В.В. Капустин [и др.] // Транспортные системы и технологии. – 2018. – № 4 (1). – С. 68–83. DOI: 10.17816/transsyst2018041068-083.
4. Дегтярев, П.А. Исследование и разработка устройств получения видеосигнала в активно-импульсной телевизионной системе наблюдения: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / П.А. Дегтярев. – Томск, 2005. – 160 л.
5. Волков, В.Г. Основы построения активно-импульсных приборов ночного видения с использованием лазерных излучателей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.27.03 / В.Г. Волков. – М., 2005. – 367 л.
6. Кирпиченко, Ю.Р. Оценка возможностей регистрации изображений активно-импульсной телевизионной системой в сложных условиях наблюдения // Ю.Р. Кирпиченко // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2 (24). – Ч. 1. – С. 114–117.
7. Капустин, В.В. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы с повышенной устойчивостью к оптическим помехам: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / В.В. Капустин. – Томск, 2017. – 118 л.
8. Тарасов, В.В. Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход: учебник / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенко; под ред. Ю.Г. Якушенко. – М.: Университетская книга, 2016. – 488 с.
9. Дьяконов, В.П. Генерация и генераторы сигналов / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс. – 2009. – 420 с.
10. Активно-импульсные системы видения и алгоритмы определения расстояний до объектов / В.А. Горобец [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2014. – Т. 81, № 2. – С. 283–291.
11. Бухаров, П.В. Фотокатоды современных ЭОП / П.В. Бухаров // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2 (24). – Ч. 1. – С. 106–109.
12. Фотоприемный модуль с фотокатодом с барьером Шоттки на основе структуры InP/InGaAs/InP:Ag и с чувствительностью до 1,7 мкм / Ю.К. Грузевич [и др.] // Прикладная физика. – 2015. – № 4. – С. 76–81.
13. Гибин, И.С. Электронно-оптический преобразователь изображения с автоэмиссионным фотокатодом / И.С. Гибин, П.Е. Котляр // Прикладная физика. – 2019. – № 3. – С. 31–38.

Генератор наносекундных импульсов накачки для активно-импульсной системы видения в дыму и расчет дальности ее действия

Generator of nanosecond pulses of pumping for an active pulse vision system in smoke and calculation of the its action range

Суриков Андрей Валерьевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра организации службы, надзора и правового обеспечения

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: shurikoff@bk.ru

ORCID: 0000-0002-3659-7297

Andrey V. Surikov

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Organization of Service, Supervision and Law Support, Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus

e-mail: shurikoff@bk.ru

ORCID: 0000-0002-3659-7297

Лешенюк Николай Степанович

доктор физико-математических наук, профессор

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра естественных наук, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: nleshenyuk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1660-9086

Nikolay S. Leshenyuk

Grand PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Natural Sciences, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus

e-mail: nleshenyuk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1660-9086

Кулешов Владимир Константинович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра естественных наук, заведующий лабораторией

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: voldemar.kul@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2478-3380

Vladimir V. Kuleshov

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Natural Sciences, Head of Laboratory

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus

e-mail: voldemar.kul@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2478-3380

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.20>

GENERATOR OF NANOSECOND PULSES OF PUMPING FOR AN ACTIVE PULSE VISION SYSTEM IN SMOKE AND CALCULATION OF THE ITS ACTION RANGE

Surikov A.V., Leshenyuk N.S., Kuleshov V.V.

Purpose. To develop a generator of nanosecond pulses for its use as part of an active pulse vision system under fire conditions and to analyze the effect of a decrease in the laser illumination pulse energy and the spectral sensitivity of the image converter system on the range of its action.

Methods. The amplitude of the pulse generated by the developed generator was determined experimentally. The dependences of the change in the range of the active pulse vision system on the pulse energy of the laser emitter and the spectral sensitivity of the image-converter were determined by the calculation method.

Findings. A generator of nanosecond pulses has been developed, which makes it possible to generate current pulses with an amplitude of up to 60 A, a duration at a level of $0.5 \tau \geq 2$ ns, with edges of 3–1.4 ns. An analytical method for calculating the range of an active pulse vision system is presented, which makes it possible to determine this parameter taking into account the wavelength of the probing radiation and the dynamics of the fire. The results of a theoretical analysis of the range of an active pulse vision system when changing the energy of the laser illumination pulse and the spectral sensitivity of the image converter system are presented.

Application field of research. The results of the study can be applied in the development of technical means designed to form an image of an object in smoke conditions.

Keywords: active pulse vision system, visibility, pulse duration of a laser searchlight, attenuation index of optical radiation, wavelength of probing radiation.

(The date of submitting: January 20, 2021)

REFERENCES

1. Surikov A.V., Petukhov V.O., Gorobets V.V. Osnovnye metody i ustroystva, primenyaemye dlya uluchsheniya vidimosti pri chrezvichaynykh situatsiyah [Current and prospective basic methods and devices to improve visibility in emergency situations]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*. 2011. No. 1(29). Pp. 121–129. (rus)
2. Surikov A.V., Leshenyuk N.S., Kuncovich B.F., Gorobets V.V. Optiko-elektronnaya sistema uluchsheniya vidimosti pri zadymlenii [Optoelectronic system to increase visibility in a smoky environment]. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2014. No. 2 (20), Pp. 4–12. (rus)
3. Kapustin V.V., Movchan A.K., Zaytseva E.V., Kuryachiy M.I. Aktivno-impul'snyye televizionnye izmeritel'nye sistemy dlya obespecheniya navigatsii transportnykh sredstv v slozhnykh meteosloviyakh [Active pulse television measuring systems for ensuring navigation of transport means in heavy weather conditions]. *Transportation Systems and Technology*, 2018. No. 4 (1), Pp. 68–83. (rus). DOI: 10.17816/transsyst2018041068-083.
4. Degtyarev P.A. *Issledovanie i razrabotka ustroystv polucheniya videosignala v aktivno-impul'snoy televizionnoy sisteme nablyudeniya* [Research and development of video signal acquisition devices in an active-pulse television surveillance system]: PhD tech. sci. diss.: 05.12.04. Tomsk, 2005. 160 p. (rus)
5. Volkov V.G. *Osnovy postroeniya aktivno-impul'snykh priborov nochnogo videniya s ispol'zovaniem lazernykh izluchateley* [Fundamentals of construction active-pulse night vision devices using laser emitters]: Grand PhD tech. sci. diss.: 05.27.03. Moscow, 2005. 367 p. (rus)
6. Kirpichenko Yu.R. Otsenka vozmozhnostey registratsii izobrazheniy aktivno-impul'snoy televizionnoy sistemoy v slozhnykh usloviyakh nablyudeniya [Evaluation of capabilities to register images made by gated viewing laser camera system in severe observation conditions]. *Proceedings of TUSUR University*, 2011. No. 2 (24), Pp. 114–117. (rus)
7. Kapustin V.V. *Aktivno-impul'snyye televizionnye izmeritel'nye sistemy s povyshennoy ustoychivost'yu k opticheskim pomekham* [Active-pulse television measuring systems with increased resistance to optical interference]: PhD tech. sci. diss.: 05.12.04. Tomsk, 2017. 118 p. (rus)

8. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Vvedenie v proektirovanie optiko-elektronnykh priborov: sistemnyy podkhod* [Introduction to the design of optoelectronic devices: a systematic approach]: textbook. Moscow: Universitetskaya kniga, 2016. 488 p. (rus)
9. D'yakonov V.P. *Generatsiya i generatory signalov* [Signal generation and generators]. Moscow: DMK Press, 2009. 420 p. (rus)
10. Gorobetz V.A., Kabanov V.V., Kabashnikov V.P., Kuntsevich B.F., Metelskaya N.S., Shabrov D.V. Active pulse vision systems and algorithms for determining distances to objects. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2014. Vol. 81, No. 2. Pp. 279–287. DOI: 10.1007/s10812-014-9922-9.
11. Buharov P.V. Fotokatody sovremennykh EOP [Photocathodes of modern image intensifier]. *Proceedings of TUSUR University*, 2011. No. 2 (24). Pp. 106–109. (rus)
12. Gruzevich Yu.K., Gordienko Yu.N., Balyasnyy L.M., Al'kov P.S., Ivanov V.Yu., Dyatlov A.L., Vatsenko P.I. Fotopriemnyy modul' s fotokatodom s bar'erom Shottki na osnove struktury InP/InGaAs/InP:Ag i s chuvstvitel'nost'yu do 1,7 mkm [Photodetector photocathode with a Schottky barrier based on the InP/InGaAs/InP: Ag structure sensitive up to 1.7 μ]. *Prikladnaya fizika*, 2015. No. 4. Pp. 76–81. (rus)
13. Gibin I.S., Kotlyar P.E. Elektronno-opticheskiy preobrazovatel' izobrazheniya s avtoemissionnym fotokatodom [Electron-optical converter with autoemission photocathode]. *Prikladnaya fizika*, 2019. No. 3. Pp. 31–38. (rus)